

Camila Renda Sepulchre

DESCARTE E RECICLAGEM DAS CÁPSULAS DE CAFÉ

São Paulo
2021

Camila Renda Sepulchre

DESCARTE E RECICLAGEM DAS CÁPSULAS DE CAFÉ

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da Escola
Politécnica da USP

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco
de Monlevade

São Paulo
2021

Agradecimentos

Devo meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que participaram não apenas desta dissertação mas de toda a minha graduação.

A Universidade de São Paulo. A minha família, em especial, aos meus pais e irmão que sempre me impulsionaram e me ajudaram. A minha querida avó Carmem que torceu como ninguém por todas as minhas conquistas. A minha companheira de jornada e melhor amiga, Paula Magalhães. Ao Centro Moraes Rego por toda a experiência e crescimento. E ao meu professor orientador Eduardo Monlevade por toda ajuda e paciência com a orientação.

Resumo

Devido ao alto e ascendente consumo de cápsulas de café de dose individual no Brasil e sua provável destinação para aterros, o presente estudo foi realizado a fim de compreender o fim de vida do resíduo gerado nesta modalidade de café. O trabalho engloba o levantamento de informações sobre cápsulas de café disponíveis no Brasil, o entendimento do processamento para a reciclagem do resíduo (no caso das cápsulas de alumínio), e o entendimento de sua logística reversa. A partir de alguns testes de fundições entende-se que a borra do café atrapalha o rendimento da fundição e a melhor maneira de realizá-la é em banho de alumínio com o auxílio de um peso para afundar as cápsulas no banho, após a lavagem das mesmas. Entende-se que o processo de reciclagem é complexo e não vale a pena para catadores de lixo, tendo necessidade de uma logística reversa dedicada por parte do fabricante que atenda todo o país, assim como a conscientização dos consumidores de como realizar o descarte correto das cápsulas.

Abstract

Due to the high and increasing consumption of single-dose coffee capsules in Brazil and its probable destination for landfills, this study was carried out in order to understand the end of life of the residue generated in this type of coffee. The work includes the collection of information on coffee capsules available in Brazil, the understanding of the processing for the recycling of the residue (in the case of aluminum capsules), and the understanding of its reverse logistics. Based on some casting tests, it is understood that the coffee grounds affect the casting yield and the best way to do it is in an aluminum bath with the aid of a weight to sink the capsules in the bath, after washing it. It is understood that the recycling process is complex and not worth it for waste pickers, requiring dedicated reverse logistics on the part of the manufacturer that serves the entire country, as well as consumer awareness on how to dispose of capsules correctly.

Lista de Figuras

Figura 1: Consumo mundial de café em sacas de 2004 a 2023*.....	11
Figura 2: Valor real do café em bilhões de dólares de 2004 a 2023*.....	11
Figura 3: Volume e valor do mercado de cápsulas de café no Brasil entre 2014 e 2019.....	13
Figura 4: Cápsulas de café de alumínio.....	15
Figura 5: Cápsulas de café de polipropileno.....	17
Figura 6: Cápsulas de café de alumínio e polipropileno.....	18
Figura 7: Representação resumida do ciclo da cápsula de café.....	24
Figura 8: Cadeia produtiva linear	26
Figura 9: Cadeia produtiva circular.....	27
Figura 10: Obstáculos e oportunidades para a economia circular dos materiais.....	28
Figura 11: Cápsula de alumínio após a lavagem: vista lateral.....	30
Figura 12: Cápsula de alumínio após a lavagem: vista superior.....	31
Figura 13 : Cápsula mista após a lavagem.....	32
Figura 14: Forno Giron	33
Figura 15: 20 cápsulas de alumínio acomodadas no cadinho.....	33
Figura 16: Na esquerda cápsula de alumínio com filtro de papel em no seu interior na direita a cápsula e o filtro separados	36
Figura 17: Cápsula mista desmontada.....	37
Figura 18: Cadinho com cápsulas de alumínio ao sair do forno.....	38

Figura 19: Cadinho com cápsulas de alumínio ao sair do forno observa-se a maior parte do alumínio oxidado e apenas uma pequena porção fundida.....	38
Figura 20: Cadinho com cápsulas em banho ao sair do forno.....	40
Figura 21: Escória da fundição com banho	40
Figura 22: Cadinho ao ser retirado do forno	41
Figura 23: Lingoteira da fundição com atmosfera de borra de café.....	42
Figura 24: diagrama de Ellingham: oxidação do Alumínio	43
Figura 25: Lingoteira com as cápsulas de alumínio	44

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo	4
Abstract	5
Lista de Figuras	6
Sumário	8
Introdução	9
Revisão Bibliográfica	11
2.1 O mercado do café	11
2.2 Cápsulas de café	12
2.3. O mercado das cápsulas de café	13
2.4. Tipos de cápsulas	14
2.4.1 Alumínio	15
2.4.2 Polímeros	16
2.4.3 Mista (alumínio + polímero)	18
2.5. Descarte	18
2.5.1 Embalagens	19
2.5.2 Wish Cycling	20
2.5.3 Legislação	21
2.5.4 Reciclagem	22
2.5.5 Conscientização ambiental do consumidor	25
2.6 Economia Circular	25
2.6.1 Logística reversa	29
Materiais e Métodos	30
3.1 Preparo das cápsulas	30
3.1.1 Lavagem da cápsula de alumínio	30

3.1.2 Lavagem da cápsula de mista	31
3.2 Fundição do Alumínio	32
3.2.1 Lavagem e fundição	32
3.2.2 Lavagem e fundição com banho	34
3.2.3 Lavagem e fundição com atmosfera da borra do café	34
3.2.4 Lavagem, preaquecimento e fundição com banho e lã de vidro	35
Resultados e Discussão	36
4.1 Preparo das cápsulas	36
4.1.1 Lavagem da cápsula de alumínio	36
4.1.2 Lavagem da cápsula mista	36
4.2 Fundição do Alumínio	37
4.2.1 Lavagem e fundição	37
4.2.2 Lavagem e fundição com banho	39
4.2.3 Lavagem e fundição com atmosfera da borra do café	41
4.2.4 Lavagem, preaquecimento e fundição com banho e lã de vidro	44
4.3 Dissolução do filme polimérico	45
4.4 Viabilidade de coleta para catadores	46
4.5 Logísticas Reversas Existentes	47
Conclusões	49
Referências	51

1 Introdução

O hábito diário de tomar café está presente na vida de inúmeras pessoas ao redor do mundo. Devido à globalização e o estilo de vida mais acelerado, surgiu a necessidade de desenvolvimento de um processo mais rápido e simples de preparação de café. Sendo assim, em 1970, surgem as primeiras cápsulas de café.

Desde que foram introduzidas no Brasil em 2006 as cápsulas de café vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado nacional. Como um dos maiores produtores e consumidores de café mundiais, o Brasil é considerado um mercado estratégico para o setor (Euromonitor, 2015). O consumo de café em monodoses, seja na forma de cafés expressos, seja em sachês ou em cápsulas, está crescendo acentuadamente no país. Para atender ao consumidor os desafios mais relevantes das cápsulas é o desenvolvimento de cápsulas baratas, eficientes e ambientalmente corretas (Nespresso). No Brasil, existem mais de 70 marcas de café em cápsulas disponíveis (ABIC, 2020). As cápsulas podem ser constituídas de alumínio, polímeros, ou mistura dos diferentes materiais. Em 10 anos, o mercado de cápsulas cresceu de R \$19 milhões para R \$1,4 bilhão (Folha, 2014). Segundo estimativas, em 2019, 12 mil de toneladas de cápsulas foram consumidas no Brasil (Euromonitor, 2019).

Entretanto, a geração do resíduo não é acompanhada pela reciclagem. A maior parte das toneladas de cápsulas consumidas por ano no Brasil acaba sendo destinada para aterros sanitários. Para que possam ser recicladas, as cápsulas devem ser separadas da borra do café utilizado e apesar de serem constituídas por materiais 100% recicláveis, é necessário o desmembramento da cápsula, processo que não é simples. A Abal e a Plastivida, entidades representativas dos setores de alumínio e plástico, respectivamente, dizem que não têm associados que desmembrem as cápsulas inteiras (Folha, 2014). Sendo assim, os resíduos do setor não são absorvidos pela indústria da reciclagem.

Em um aterro sanitário as cápsulas de plástico levam mais de 500 anos para serem degradadas e as de alumínio entre 150 e 200 anos (Eco Coffee, 2017).

Cada vez mais se fazem necessárias análises sobre os potenciais impactos dos produtos para o meio ambiente (Euromonitor, 2019). A destinação correta de resíduos é importante do ponto de vista ambiental. A implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010 evidencia tal importância. A política entende como essencial a disposição correta dos resíduos para a preservação dos recursos naturais, manutenção da saúde pública (Brasil, 2010).

Levando em consideração que o reuso possui grande impacto na diminuição da geração de resíduos sólidos e na geração de impactos ambientais muitas das empresas produtoras e comercializadoras de cápsulas de café fazem parte do acordo setorial de Logística Reversa assinado em 2015, e devem, portanto, apresentar a programas de logística reversa.

Frente a este cenário, o seguinte trabalho propõe o levantamento de informações sobre as cápsulas de café de modo a contextualizar a situação atual do gerenciamento do resíduo de cápsulas no Brasil, as políticas e logísticas reversas existentes e um estudo de como seria feita o processo de reciclagem das cápsulas de alumínio, avaliando a o final do ciclo de vida da cápsula.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 O mercado do café

O café é umas das bebidas mais consumidas do mundo que está presente, diariamente, na rotina de pessoas pelo mundo todo. É a segunda maior commodity mundial em valor de mercado, perdendo apenas para o petróleo. São cerca de 80 países que cultivam o café e as várias espécies do gênero *Coffea* (Murthy, 2012).

Estados Unidos e Brasil são os dois maiores países consumidores de café, neles o consumo de tal bebida perde apenas para o da água (ABIC, 2020). Como pode-se observar nas figuras a seguir, tanto o consumo mundial de café como o seu valor real têm aumentado nos últimos anos e apresentam projeções, até 2023, de crescimento.

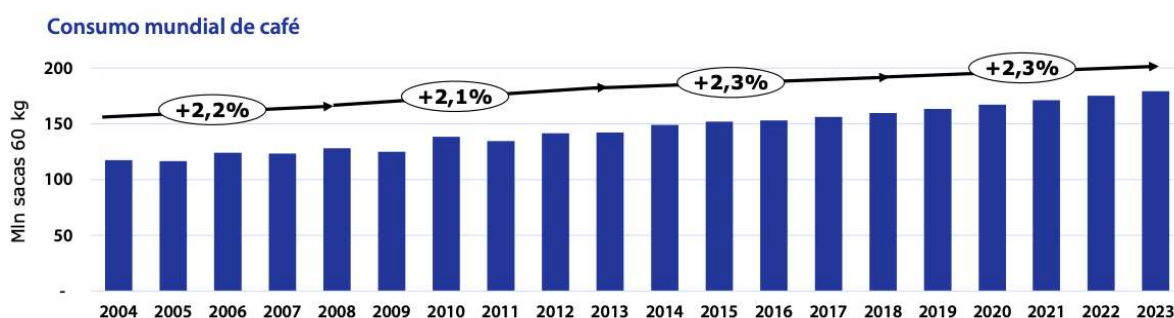


Figura 1: Consumo mundial de café em sacas de 2004 a 2023* (ABIC, 2019)

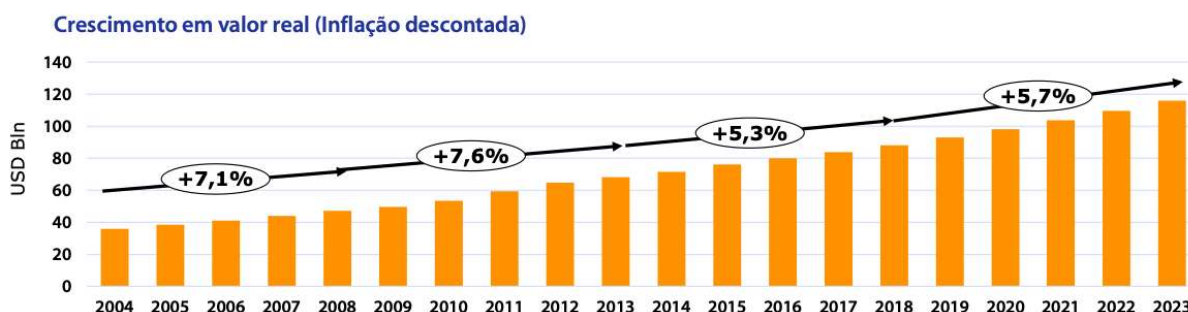


Figura 2: Valor real do café em bilhões de dólares de 2004 a 2023* (ABIC, 2019)

O consumo de café no Brasil representa 15% do volume mundial. Só em 2019 foram consumidas 1,2 milhão de toneladas de café no país. Contabilizando

anualmente uma média de 890 xícaras por pessoa e um gasto anual médio com café no varejo de R \$124 por pessoa, mais do que o brasileiro gasta com remédios (Euromonitor, 2019).

2.2 Cápsulas de café

As cápsulas de café se tornaram muito populares nos últimos anos. São recipientes que contêm a quantidade certa de café moído para uma xícara. Ocupam pouco espaço e determinadas cápsulas são compatíveis com determinadas máquinas de café expresso.

A primeira cápsula de café foi criada em 1970 por Jean-Paul Gaillard que objetivava uma forma mais rápida e prática na preparação de um expresso. Em 1976, Eric Favre, engenheiro da Nestlé, criou a primeira cápsula de café da Nestlé mas foi somente em 1994 que a primeira cápsula foi comercializada. A cápsula, na época, era feita de alumínio e pesava 3 gramas, sendo 2g só do filtro (Major and Calafut, 1998).

As cápsulas conhecidas hoje são bem diferentes da desenvolvida por Eric Favre. Durante os anos houveram grandes mudanças desde o material utilizado e o design até ao seu conteúdo. Além do café, hoje, pode-se encontrar cápsulas de chás, leite, sopas, bebidas gaseosas, etc.

Atualmente, é uma indústria bilionária em expansão com inúmeros concorrentes disputando pelo mercado. As cápsulas e a preparação do café no geral são específicas de cada marca (Major and Calafut, 1998).

Por muitos anos o consumo de café em cápsula foi divulgado de forma “premium”, agregando um certo status pelo seu custo individual de consumo. Em 2013, a patente tecnológica da Nestlé cai e novas empresas começam a adentrar esse mercado. Apenas no Brasil, em menos de cinco anos, aproximadamente 100 empresas foram criadas (De Almeida, 2016).

Desde então, nota-se o barateamento das cápsulas e máquinas. Ademais, a Nespresso ® vem perdendo porcentagem de participação no mercado para concorrentes. No ano de 2013, sua participação no mercado brasileiro era de 45,7%,

já em 2015, esse valor foi reduzido a 38%. Ainda sim, nesse período, a receita da Nespresso, no Brasil, cresceu passando de US \$123,5 milhões em 2013 para US \$179,8 milhões em 2015 (EuroMonitor, 2015).

2.3. O mercado das cápsulas de café

Em uma pesquisa realizada pela Unicamp em conjunto com a Axxus, em 2019, sobre hábitos e preferências dos consumidores de café no Brasil constatou-se que 16% dos brasileiros preferem tomar café em máquinas de sachê ou cápsula (Axxus, 2019).

Entre todas as categorias de consumo de café é esperado que o mercado de cápsulas apresente as maiores taxas de crescimento global (ABIC, 2019). Os menores preços das cápsulas e os sabores inovadores impulsionam o consumo da categoria. Cada vez mais o consumidor deve optar por esse tipo de café em suas casas, em detrimento do preparo do café em pó (Axxus, 2019).

Como podemos observar na Figura 3, no Brasil, o mercado de cápsulas vem crescendo há anos tanto em valor como em volume.



Figura 3: Volume e valor do mercado de cápsulas de café no Brasil entre 2014 e 2019 (Axxus, 2019)

Em 2019, 12 mil de toneladas de cápsulas foram consumidas no Brasil. Esse mercado representa 1,1% do mercado de café, mas até 2024 estima-se que atinja 1,3% (EuroMonitor, 2019).

Mesmo com seguidos anos de crescimento, tal mercado ainda possui muito espaço para crescer. Apesar do consumo do café em cápsulas contentar 96% no varejo, pesquisas indicam que apenas 18% dos brasileiros possuem uma máquina de café em cápsulas em suas casas e que 28% apresentaram intenção de compra em um futuro próximo (Axxus, 2019).

A procura por cafés especiais tem crescido entre os consumidores de maior renda. O consumidor está começando a diferenciar o café por tipo de grão, intensidades e sabores, a tendência é se aprimorar (Axxus, 2019). Junto com a demanda por cafés de melhor qualidade, os consumidores também têm buscado maior sustentabilidade e transparência (PDG, 2020).

O crescimento do setor leva ao crescimento dessa classe de resíduos. No Brasil, em 2018, menos de 5% de todas as cápsulas produzidas foram recicladas, cerca de 56 bilhões de cápsulas foram para aterros (PDG, 2020). O destino final geralmente é o aterro sanitário, a reciclagem das cápsulas ainda não funciona bem no Brasil (Pontes, 2016).

Segundo estudos, menos de 10% dos consumidores brasileiros estão dispostos a pagar mais por produtos sustentáveis ou ecologicamente corretos (EuroMonitor, 2019) apesar de 29% julgar um importante diferencial o selo socioambiental (Axxus, 2019).

2.4. Tipos de cápsulas

Existem diferentes materiais que podem ser usados para a fabricação das cápsulas. Existem cápsulas de alumínio, alguns tipos de polímeros como polipropileno, polietileno, polietileno tereftalato (PET) e mistura entre alumínio e polímeros.

O material a ser utilizado para a fabricação das cápsulas leva em consideração alguns fatores como: preço, resistência, data de validade, forma de fabricação, facilidade de reciclagem, etc.

2.4.1 Alumínio

O alumínio é um dos metais mais abundantes na Terra. A bauxita precisa passar por processos de refinamento para obtenção de alumina calcinada e, então, por uma redução eletrolítica para a obtenção do alumínio metálico (Pires, 2007). Se por um lado a fabricação de alumínio consome uma enorme quantidade de energia, por outro é um material que pode ser infinitamente reciclado (Aluminium Stewardship Initiative - ASI, 2016).

A reciclagem torna a produção de alumínio bastante vantajosa em termos de consumo energético e consequentemente financeiros. As taxas de redução de consumo de energia chegam a até 95% (Pires, 2007). Sendo assim, é de grande interesse sócio-econômico-ambiental que a reciclagem de alumínio cresça.

Devido às suas características físico-químicas o alumínio garante um bom isolamento de luz, umidade e ar atmosférico. É considerado um dos melhores materiais para preservação da qualidade do café e, portanto, muito utilizado nas cápsulas. Ademais, as cápsulas de alumínio não são prejudiciais à saúde, pois são revestidas por uma película que evita o contato direto do metal com o café moído. A liga de alumínio específica para as cápsulas de café é o alumínio 1100.



Figura 4: Cápsulas de café de alumínio (Nespresso)

Por outro lado, o alumínio apresenta pontos negativos como sua dificuldade de combinação com algum material filtrante e elevado custo de fabricação, o que encarece o preço final do produto. Para a fabricação de uma cápsula de alumínio, o

metal passa por um processo de prensagem sendo conformadas de acordo com o molde, preenchidas com o pó de café e hermeticamente fechadas com uma tampa também de alumínio. Só então são extraídas do molde e estão prontas.

2.4.2 Polímeros

Um polímero é um conjunto de monômeros conectados por ligações covalentes. As diferentes sequências de repetições de monômeros formam diferentes polímeros. As propriedades físicas dos polímeros variam de acordo com com os tipos e repetições de monômeros (Canevarolo, 2006).

As principais matérias primas para produção de monômeros são o carvão mineral pelo processo de destilação seca, petróleo pelo craqueamento e produtos naturais como celulose, borracha natural, óleo de mamona e óleo de soja.

Só em 2019, 7,1 milhões de toneladas de plástico foram produzidas e o faturamento da indústria foi de 81,3 bilhões. Os três setores que mais consomem plástico são, há alguns anos, o de construção civil, alimentos e automóveis e autopeças (ABIPLAST, 2019).

Em 2018, cerca de 22,1% dos plásticos provinham de reciclagem pós consumo. Ainda, segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico, cada tonelada de material reciclado reduz 1,1 toneladas de resíduo plástico disposto em aterros e gera uma média de 3,16 empregos para catadores que recolhem esse material (ABIPLAST, 2019). Nota-se ainda bastante espaço para crescimento das taxas de reciclagem desse material, com interesses financeiros, sociais e ambientais.

Para que o material possa ser utilizado nas máquinas de café é necessário que seja resistente à altas temperaturas, atóxico, e resistir a pressão de operação das máquinas. Entre os diversos polímeros utilizados os principais são: polipropileno (PP), polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), ácido polilático (PLA).

O polipropileno é o mais utilizado nas cápsulas, além de ser relativamente barato, de fácil coloração e baixa densidade, garante a frescura dos aromas e sabores durante, pelo menos, 12 meses (Smith, W. 1998).

Ademais, o polipropileno pode ser considerado um plástico sustentável por ser 100% reciclável e apresentar uma menor emissão de gases de efeito estufa na sua produção (Canevarolo, 2004).



Figura 5: Cápsulas de café de polipropileno (Kotsev, 2017)

Contudo, este polímero é sensível aos raios ultravioleta e aos agentes de oxidação, degradando-se mais facilmente (Duarte et al, 2012).

Para a fabricação de uma cápsula de polipropileno, o rolo do polímero é inicialmente aquecido e depois passa por uma extrusora, a cápsula é conformada e então preenchida com o café. Para fechar a cápsula é utilizado um rolo duplo ou triplo de filme com camada de alumínio e então selado por pressão ou temperatura. A seguir a prensa pneumo-mecânica realiza o corte das cápsulas e o produto está pronto (Kotsev, 2017).

Mais recentemente, foram desenvolvidas cápsulas de polímeros verdes, feitas de materiais naturais e de fontes renováveis como por exemplo a cana de açúcar. As cápsulas feitas a base de cana de açúcar, possuem barreira ao oxigênio, garantindo a qualidade do café, são biodegradáveis e compostáveis, se degenerando em compostagem industrial ou termofílica com umidade e temperaturas controladas (Melitta).

2.4.3 Mista (alumínio + polímero)

As cápsulas mistas apresentam mais de um material, com fração significativa, em sua composição. A mistura de materiais é feita com o objetivo de se obter uma cápsula com a alta qualidade que o alumínio oferece, porém que seja mais acessível economicamente e portanto atinja uma parte maior do mercado.

Com as cápsulas mistas veio um novo método de preparo das bebidas, no qual para se preparar uma xícara são necessárias duas cápsulas, gerando assim o dobro de resíduos.



Figura 6: Cápsulas de café de alumínio e polipropileno (Nescafé)

Vale ressaltar que, em geral, todos os componentes das cápsulas mistas são recicláveis. Entretanto a separação dos componentes, nem sempre é um processo simples, podendo dificultar a sua reciclagem.

2.5. Descarte

O descarte adequado de resíduos sólidos leva tamanha importância uma vez que apresenta impactos tanto ambientais como econômicos.

Em termos ambientais, entre os muitos impactos derivados da disposição inadequada de resíduos sólidos estão a poluição visual, a liberação de substâncias químicas voláteis pela decomposição que contaminam o ar, o solo, a água e geram maus odores, a infiltração de substâncias em solos e aquíferos devido a lixiviação, a eutrofização, a toxicidade de algumas substâncias e a bioacumulação na cadeia alimentar (Barretos et al, 2013).

Economicamente falando, um estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em 2010 apontou que além das vantagens ambientais a reciclagem proporciona vantagens competitivas para as empresas com a redução de custos em processos, isso sem falar nos empregos gerados. Devido a energia necessária na extração de alumínio o preço desse pode cair de R\$6,1 mil para R\$3,4 mil por tonelada. Ainda no estudo, constatou-se que o Brasil deixa de ganhar cerca de R\$8 bilhões anualmente por jogar em aterros resíduos que poderiam ser reciclados (IPEA,2010).

Considerando que um brasileiro gera em média 379 Kg de resíduo por ano (ABRELPE, 2020) é indispensável o descarte adequado e a separação dos resíduos. Usualmente a separação acaba não sendo realizada pela dificuldade de identificação e a separação de fato dos diferentes materiais.

O principal tipo de destinação adequada para cápsulas, atualmente, são os pontos de entrega voluntária (PEV), que requerem que o consumidor armazene o resíduo e entregue em pontos de coleta ofertados pela marca do produto. As PEV's, normalmente, estão localizadas em lojas particulares, supermercados e pontos de venda do produto (Proteste, 2016).

2.5.1 Embalagens

As embalagens além de sua função primária de proteção e agrupamento do produto exercem uma função informativa sobre o mesmo, seus cuidados e modo de descarte. O uso inadequado ou até mesmo ausência da simbologia de identificação dos materiais podem atrapalhar a reciclagem e causar até o desperdício de materiais recicláveis.

Em 2016 foi feita uma pesquisa feita com as três principais marcas de café em cápsulas do Brasil (Nespresso, 3 Corações e Dolce Gusto) pela associação brasileira de defesa ao consumidor. Em relação aos rótulos as três marcas deixam de orientar os consumidores da maneira correta de descarte. Sobre as PEV's as três marcas restringem as informações em seus sites (Proteste, 2016).

2.5.2 *Wish Cycling*

Wish-cycling, também conhecido como reciclagem aspiracional, é a prática de querer reciclar itens que não podem ser reciclados, em geral, com as melhores intenções. Está relacionado ao ato de jogar qualquer item questionável na lixeira reciclável, seja porque outra pessoa vai descobrir se o item pode ou não ser reciclado ou porque é melhor tentar. Esses atos, embora provavelmente bem-intencionados, estão contaminando a reciclagem em todo o mundo, aumentando o tempo e o custo do processo de reciclagem. As taxas de contaminação em instalações de reciclagem aumentaram significativamente nos últimos cinco anos (Singer, 2017).

Potes de manteiga, recipientes de papelão de hambúrgueres e pizzas são alguns exemplos de materiais que podem ser reciclados, entretanto os recicláveis devem ser limpos de alimentos presos. Os resíduos gordurosos deixados para trás não são bons. Impactam a qualidade dos materiais reciclados produzidos posteriormente. Itens limpos processados com aquela embalagem gordurosa ou comida presa são contaminados, podendo tornar todo o lote inútil (Farnsworth, 2020).

Ao colocar itens na lixeira que não deveriam ser reciclados, os trabalhadores passam a ter o retrabalho de separar os recicláveis manualmente e os itens que deveriam ter sido colocados no lixo comum são separados e os caminhões devem levá-los ao aterro. O transporte extra acaba gerando taxas e/ou impostos. Em fábricas onde os recicláveis são separados por máquinas, as máquinas podem emperrar ou quebrar. Reparos e manutenção são caros e tornam o ciclo de processamento mais lento. As sacolas plásticas são conhecidas por causar congestionamentos nas máquinas (Farnsworth, 2020).

Um exemplo clássico de *wish-cycling* são as cápsulas de café. Muitas vezes as cápsulas são jogadas em lixo recicláveis entretanto, na maioria dos casos, essas precisam de um processo de reciclagem específico tornando inviável sua reciclagem junto a outros objetos, sendo assim redirecionadas para aterros (Pontes, 2016).

Para evitar esse crescente fenômeno é necessário educar e conscientizar a população não só sobre como deve ser feito o descarte, mas também, sobre o que pode ser reciclado em suas respectivas regiões (Farnsworth, 2020).

2.5.3 Legislação

Tendo em vista a importância do descarte adequado de resíduos, em 2010 foi instituída as diretrizes de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nela estão estabelecidos os princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, responsabilidades do poder público, dos geradores, dos consumidores, e princípios orientadores como prevenção e precaução, poluidor pagador, ecoeficiência, responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida de para gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos (Brasil, 2010).

Entre os objetivos da PNRS destacam-se atividades de gestão de resíduos sequenciadas: não geração; redução; reutilização; reciclagem; tratamento e/ou beneficiamento.

São considerados como destinação final ambientalmente adequada de resíduos e rejeitos a reutilização, a reciclagem, o aproveitamento energético, o tratamento e/ou beneficiamento e a disposição final (Brasil, 2010). A disposição final é o aterramento do rejeito quando o mesmo não possui tecnologia para reutilização, reciclagem, tratamento e/ou beneficiamento.

Dentre os instrumentos citados pela PNRS para cumprir seus objetivos observa-se a coleta seletiva e a logística reversa. E alguns itens destacam-se como: a análise do ciclo de vida (ACV); incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas e outras formas de associação dos catadores de materiais recicláveis; responsabilidade compartilhada que torna responsáveis pelo ciclo de vida de produtos os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (Ministério do Meio Ambiente, 2012); (BRASIL, 2010).

A logística reversa é um instrumento de desenvolvimento econômico e social previsto na PNRS que merece destaque. O acordo para embalagens em geral foi firmado em novembro de 2015 onde fabricantes, importadores, comerciantes e

distribuidores se comprometeram a trabalhar de forma conjunta para garantir a destinação final ambientalmente adequada das embalagens que colocam no mercado. O acordo contou com 20 associações brasileiras representantes do setor empresarial composto por produtores, usuários, importadores e comerciantes de embalagens em geral. Entre eles estão as empresas responsáveis por fabricar, importar, comercializar e distribuir cápsulas de café.

2.5.4 Reciclagem

A reciclagem de resíduos sólidos pode ser descrita como o reprocessamento de materiais no final da vida do produto para reinserção na cadeia de produção (Worell; 2014). A cadeia de reciclagem tem como objetivo agregar tanto valor econômico, quanto ecológico para os bens de pós-consumo e é constituída por várias etapas. Inicia-se com o processo de gerenciamento de resíduos com o descarte, coleta, triagem, composição de fardos, comercialização do material, logística de transporte, beneficiamento pela indústria e, por último, o mercado para o novo produto (Gonçalves-Dias et al., 2010).

Além dos ganhos ambientais e sociais, a reciclagem também mostra-se interessante financeiramente falando. Os resíduos ao serem utilizados como matéria prima secundária nas indústrias diminuem os gastos na produção, no consumo de energia e na extração de matéria-prima virgem (Benvid, 2010).

A melhor destinação de um material pós consumo depende de uma série de considerações como o material em questão, a viabilidade econômica, a logística e a legislação ambiental e sanitária (Gorni, 2006). Para que um material seja reciclado é necessário que este apresentem viabilidade tanto técnica como econômica.

A viabilidade técnica são as tecnologias e as etapas de processamento que não degradem as características do material e, ao mesmo tempo, conferem a forma e a pureza desejadas. A qualidade técnica, baseada nas propriedades pós processamento, define o preço e os casos em que é possível usar o material reciclado. Os critérios classificatórios de qualidade técnica são: cor, forma e qualidade/pureza.

A viabilidade econômica é a obtenção de margem de lucro suficiente para incentivar essa cadeia produtiva mesmo com custo de captação e processamento.

A separação dos materiais individualmente ou em misturas recicladas está entre as etapas mais importantes e relaciona-se com o mercado de reprocessamento. A mistura de plástico com alumínio, por exemplo, não é usualmente reciclada dado que suas aplicações são reduzidas. Polietileno e polipropileno também não podem ser misturados pois são de mercados de processamento diferentes.

A quantidade de diferentes materiais nos resíduos torna inviável o preço do processamento. Assim a reciclagem de materiais coletados dificilmente é realizada apenas com a segregação pós consumo, as latas de alumínio são um exemplo clássico. As cápsulas, assim como as latas de alumínio, estão entre os resíduos que não podem ser reciclados apenas com a segregação, necessitam de etapas de processamento para obter valor no mercado.

A quantidade de operações necessárias (coleta, transporte, separação e processamento) para se obter o produto final está diretamente relacionada com preço do processo e conseqüentemente com o lucro e a atratividade do processo de reciclagem.

Na Figura 7 observa-se o ciclo de vida de uma cápsula de alumínio da Nespresso®.



Figura 7: Representação resumida do ciclo da cápsula de café. (Folha, 2017)

2.5.5 Conscientização ambiental do consumidor

Entre os principais agravantes da poluição ao meio ambiente temos os hábitos de consumo das sociedades. Isto ocorre uma vez que os consumidores não estão conscientes que esta poluição é causada por eles próprios e eles são afetados diretamente (Guimarães, 2015).

Nos dias de hoje, a conscientização de educação ambiental assume um papel de equilíbrio entre o homem e o ambiente, pensando no futuro por meio de um equilíbrio entre o desenvolvimento e a preservação. A conscientização ambiental contribui para uma redução da exploração dos recursos naturais e diminuição na geração de resíduos (Larsen, 2017).

Em 2017, a Nespresso® reciclou 56% de todas as cápsulas de café vendidas por eles no mundo todo, entretanto considerando apenas no Brasil esse número é de 13,3% (Nespresso, 2018). Dado esse que se contrasta com o fato do Brasil ser líder na reciclagem de latas de alumínio há mais de 10 anos, reciclando 96,9% das latinhas vendidas em 2018 (Alumínio, 2020), com isso, torna-se evidente a maior complexidade na reciclagem das cápsulas. Entre as dificuldades adversas temos a falta do hábito da reciclagem entre os consumidores brasileiros (Nespresso, 2018).

O Brasil tem uma grande necessidade de conscientização ambiental não só nas escolas, mas também em iniciativas de educação e conscientização ambiental que partam de empresas e indústrias, que promovam o consumo sustentável com uma gestão ecologicamente adequada dos resíduos de seus produtos, informando os consumidores sobre a melhor maneira de descartar seus resíduos e fornecendo alternativas para destinação adequada dos mesmos (Larsen, 2017).

2.6 Economia Circular

Atualmente a grande maioria dos materiais utilizados pela sociedade segue uma forma de organização linear baseada na extração crescente dos recursos naturais. Produtos feitos com esses recursos são utilizados até serem descartados como resíduos como ilustrado na Figura 8:

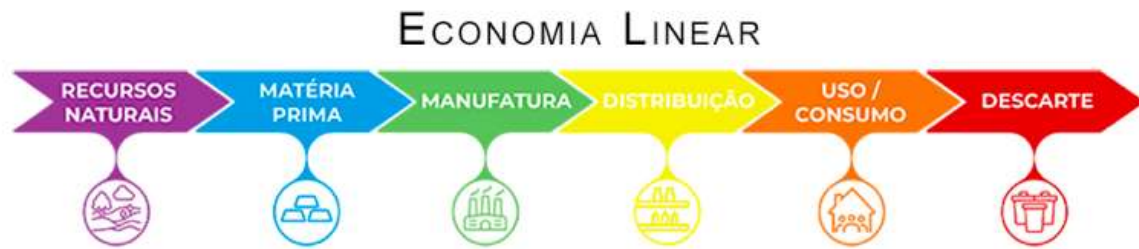


Figura 8: Cadeia produtiva linear (Allen, 2018)

Dessa forma, o único jeito de se obter mais produtos é pela maior quantidade de extração e produção.

Com o crescimento da demanda por produtos esse tipo de economia é considerada inviável, dado que os recursos existentes no planeta são finitos. Sendo assim, a tendência de custo dos materiais é aumentar fazendo com que a eficiência na utilização dos recursos aumente (F. Ashby, 2016).

A premissa que a natureza é uma fonte inesgotável de recursos e que possui capacidade infinita de deposição é inviável e muito perigosa. Com o crescimento da população mundial, o consumo de recursos e geração de resíduos atual já é considerado insustentável para o planeta (M. Zanin, 2009).

Dado esse contexto, torna-se imprescindível o estudo sobre esses materiais no final da cadeia produtiva. O que pode ser feito em relação a esses resíduos e como inseri-los no ciclo de vida dos materiais, evitando o fim da sua vida útil e o modelo econômico linear.

Definido como um conceito paralelo às atividades impostas pela Economia Linear, a Economia Circular surgiu na década de 70 e não se resume apenas a reinserir os materiais dentro da cadeia produtiva mas em repensar a cadeia, redesenhando-a de uma forma que seja viável economicamente e ambientalmente (F. Ashby, 2016).

Em 1990 Pearce & Turner formaliza o conceito de economia circular por meio de uma crítica do sistema produtivo linear, baseada na primeira e na segunda lei da termodinâmica. Segundo a primeira lei, nenhuma energia poderia ser criada ou destruída, apenas transformada, sendo assim, os recursos naturais utilizados

sempre retornaram ao meio ambiente. Na segunda lei temos que a entropia no universo pode só aumentar, deduziu-se assim que por maior que seja o esforço nunca seria possível reciclar ou devolver, com 100% de eficiência, para o meio ambiente os materiais utilizados (V. Rizos, 2017).

Na economia circular os materiais são encarados como bens de valor que podem retornar a cadeia produtiva e não como resíduos sem valor. Assume-se que todos os produtos e serviços têm origem em fatores da natureza, e que, no final de vida útil, retomam mais uma vez à natureza através de resíduos ou através de outras formas com menor impacto ambiental.

Esse modelo econômico engloba partilha, reutilização, reparação e reciclagem objetivando a longevidade dos materiais. A Figura 9 ilustra o sistema produtivo circular.



Figura 9: Cadeia produtiva circular (Allen, 2018)

O processo de transição de uma economia linear para uma economia circular é gradual e desafiador por exigir novas habilidades e uma reorganização em várias partes do sistema produtivo. Para a efetiva transição inúmeros pontos terão de ser reestruturados: produtos, cooperação em cadeia, finanças, logística, cultura, educação, etc.

A Figura 10 esquematiza os obstáculos e oportunidades da economia circular. Na parte tecnológica temos melhorias na extração dos materiais, no processo de reciclagem, maior durabilidade do produto e menor quantidade de matéria prima. No campo estratégico podemos ver modelos de negócios diferenciados como políticas de devolução de produtos já utilizados. Por último, na parte de estilo de vida podemos ver um produto contendo menos materiais ou até não contendo materiais específicos e mudanças de hábitos sociais de reciclagem.

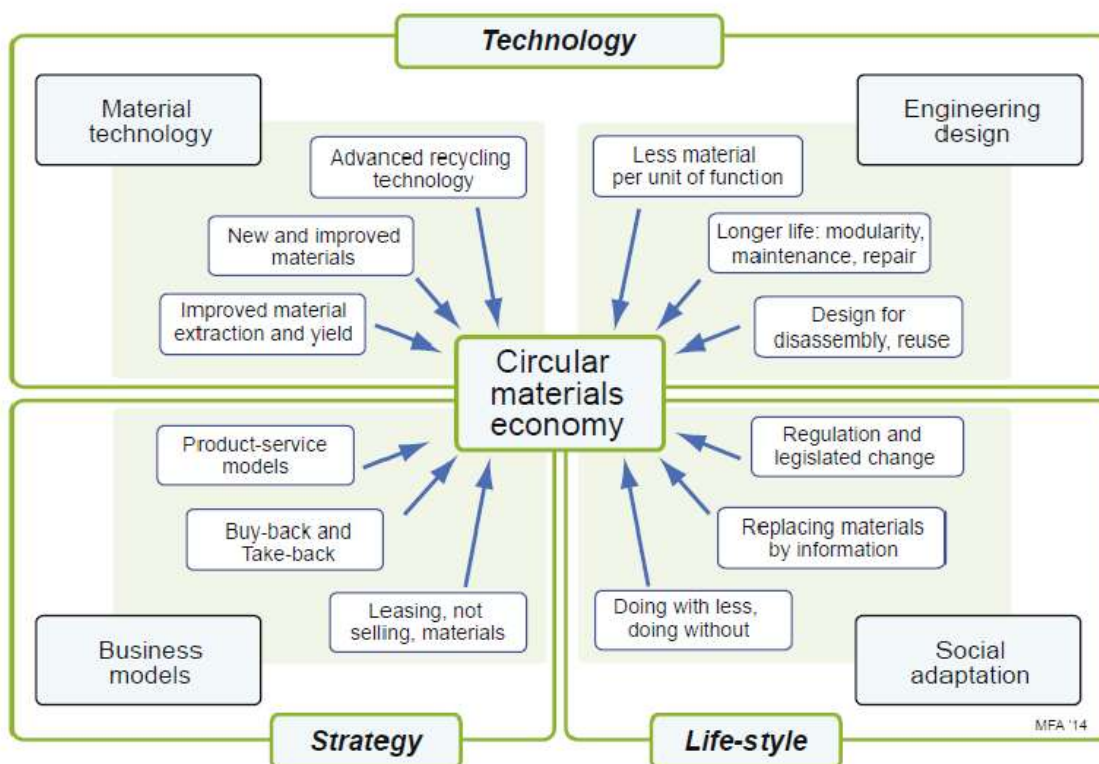


Figura 10: Obstáculos e oportunidades para a economia circular dos materiais (F.Ashby, 2016).

É possível notar que a economia circular bem-sucedida exige mudanças em diferentes etapas do ciclo de vida do produto. Fluxos de materiais de duas cadeias diferentes podem ser relevantes um para o outro, por isso, é de extrema importância que empresas procurem colaboradores fora da sua própria cadeia de valor.

Atualmente existe um foco maior ao desenvolvimento de produtos mais sustentáveis desde a extração da sua matéria prima até a forma como esse retornará ao meio ambiente após o uso. A economia circular foi citada como estratégica na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de

2021 (COP 26) para redução da emissão de dióxido de carbono na atmosfera (CNN, 2021). Em contrapartida, são inúmeros os produtos, mesmo que lançados recentemente, que ainda vão diretamente contra essa linha de pensamento. Objetivando a praticidade e agilidade que a vida moderna exige temos as cápsulas de café.

A necessidade de um desenvolvimento sustentável traz a logística reversa como uma alternativa para a redução de resíduos sólidos, que vem crescendo nos últimos anos dado os ciclos de vida menores dos produtos que rapidamente se tornam obsoletos (Lacerda, 2002).

2.6.1 Logística reversa

A logística reversa é o processo de planejar, operar, e controlar os fluxos de materiais e produtos desde o estoque até o ponto de reprocessamento, de modo a recuperar valor ou dar a finalidade correta ao produto (Shibao, 2010). Como um processo de planejamento, operacionalização e controle das informações correspondentes ao retorno dos bens pós consumo ao ciclo produtivo, mediante canais de distribuição reversa, agrega-lhes valor econômico, ecológico, legal, entre outros (Cunha et al. 2020).

A logística reversa relaciona-se com a sustentabilidade e favorece seu desenvolvimento, dado que objetiva a redução da poluição e desperdícios de insumos. Na logística reversa a empresa recolhe os produtos e esses seguem três destinações possíveis: descarte seguro, reciclagem do produto ou reaproveitamento (Shibao, 2010).

O conceito de logística reversa é algo recente entre as empresas e vai de encontro a ideia de uma economia circular. O cuidado de como os resíduos do produto fabricado voltariam para serem reciclados segue a crescente preocupação com a sustentabilidade, com a geração de resíduos sólidos e com a disponibilidade finita de matérias primas. Apesar do tema estar em foco atualmente, ainda é novo e não se vê tanta divulgação sobre a logística reversa das cápsulas de café expresso (Ecycle, 2013).

3 Materiais e Métodos

Para que ficasse claro o processo de que a cápsula deve passar após chegar em um centro de reciclagem optou-se por entender as etapas esta teria que passar para se tornar um produto comercializável novamente, como matéria prima.

3.1 Preparo das cápsulas

Inicialmente, foram reunidas cápsulas de café pós uso (que seriam descartadas) e essas passaram por um processo de limpeza.

3.1.1 Lavagem da cápsula de alumínio

Para a lavagem das cápsulas de alumínio foi necessário cortar o filme superior da cápsula, remover a borra de café e então passar na água para retirar os restos de resíduo do recipiente.



Figuras 11: Cápsula de alumínio após a lavagem: vista lateral (Autor, 2021)



Figuras 12: Cápsula de alumínio após a lavagem: vista superior (Autor, 2021)

Para esse processo foram utilizadas 10 cápsulas como exemplo, para que fosse possível ter noções médias de como seria o processo em escalas maiores. O filme de alumínio foi rompido com o auxílio de uma colher, também utilizada para remover o excesso de borra de café das cápsulas. Em seguida as cápsulas foram lavadas com água. O tempo foi cronometrado, a água utilizada foi medida, a borra de café que foi retirada e as cápsulas, já limpas, pesadas.

3.1.2 Lavagem da cápsula de mista

Para a lavagem das cápsulas de polietileno com alumínio também foi necessário cortar o filme superior da cápsula, remover a borra de café e então passar na água para retirar os restos de resíduo do recipiente.



Figura 13: Cápsula mista após a lavagem (Autor, 2021)

Para esse processo, assim como o das cápsulas de alumínio, foram utilizadas 10 cápsulas como exemplo. O filme de papel superior foi rompido com o auxílio de uma colher, também utilizada para remover o excesso de borra de café, em seguida as cápsulas foram lavadas com água. O tempo foi cronometrado e a água utilizada foi medida.

3.2 Fundição do Alumínio

Após sua limpeza as cápsulas devem passar por um processo de processamento para que se tornem um produto comercializável novamente, como matéria prima.

Para restringir o escopo da pesquisa, optou-se por estudar as cápsulas de alumínio apenas.

3.2.1 Lavagem e fundição

Como primeiro teste, as cápsulas de alumínio, já limpas, foram levadas ao forno direto, com o intuito que o alumínio fosse fundido.

Foi utilizado um forno Giron (número de série 1815) de 220V do Hall Tecnológico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Vinte cápsulas limpas de alumínio foram acomodadas no cadinho e então colocadas no forno preaquecido a 750 °C por 28 minutos.



Figura 14: Forno Giron (Autor, 2021)



Figura 15: 20 cápsulas de alumínio acomodadas no cadinho (Autor, 2021)

3.2.2 Lavagem e fundição com banho

O segundo método utilizado para tentar fundir as cápsulas de alumínio foi a fundição com banho de alumínio.

Mais uma vez foi utilizado o forno Giron (número de série 1815) de 220V do Hall Tecnológico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Inicialmente, trinta cápsulas de alumínio foram limpas e pesadas. As peças de alumínio, que seriam usadas como banho, também foram pesadas.

Em seguida, um cadinho, apenas com as peças de alumínio do banho, foi adicionado ao forno preaquecido a 750 °C. Depois de 30 minutos e com o banho já aquecido e no estado líquido foram adicionadas 5 cápsulas por vez em um intervalo de aproximadamente 5 minutos entre cada adição.

Após todas as cápsulas serem adicionadas, o cadinho permaneceu no forno por mais 10 minutos, foi retirado e o fundido derramado sobre uma lingoteira. O lingote principal e a escória foram pesadas.

3.2.3 Lavagem e fundição com atmosfera da borra do café

Dessa vez, foi utilizado a borra do café como atmosfera para fundir as cápsulas. Sendo assim, depois da lavagem, 19 cápsulas de alumínio foram pesadas e adicionadas ao cadinho. Em seguida, as cápsulas do cadinho foram cobertas por borra de café até que o cadinho ficasse cheio.

Após 35 minutos no forno Giron, (número de série 1815) de 220V do Hall Tecnológico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, a 750 °C o cadinho foi retirado e o fundido pesado.

3.2.4 Lavagem, preaquecimento e fundição com banho e lã de vidro

Após serem limpas, as cápsulas de café foram para forno Giron (número de série 1815) de 220V a 320 °C por 30 minutos para que a película polimérica e a tinta das cápsulas queimassem.

Em seguida, as cápsulas foram retiradas do forno, pesadas e acomodadas no cadinho junto ao banho de alumínio, também pesado. A lã de vidro foi acomodada em cima de todo alumínio e o cadinho colocado no forno Giron a 750 °C por mais 40 minutos.

Passado o tempo a amostra foi retirada do forno, despejada na lingoteira e mais uma vez pesada.

4 Resultados e Discussão

4.1 Preparo das cápsulas

4.1.1 Lavagem da cápsula de alumínio

O processo todo para as 10 cápsulas demorou 4 minutos e 46,51 segundos e gastou 3,3 litros de água. Calculando uma média por cápsula temos uma média de 28,65 s e 330 mL.

Ao desmontar a cápsula é possível observar que há um filtro de papel colado em seu fundo (Figura 16) difícil de ser removido manualmente.



Figura 16: Na esquerda cápsula de alumínio com filtro de papel em no seu interior e na direita a cápsula e o filtro separados (Autor, 2021)

Ao pesar a borra de café (ainda úmida) retirada tem-se 117,09 g e as cápsulas limpas 14,06 g. Sendo assim, apenas aproximadamente 10% do peso de uma cápsula após uso é de alumínio.

4.1.2 Lavagem da cápsula mista

Nas cápsulas mistas notou-se uma borra de café mais aguada, com menos pó. O processo todo para as 10 cápsulas demorou 2 minutos e 53,15 segundos e

gastou 2,8 litros de água. Fazendo uma média por cápsula temos uma média de 17,32 s e 280 mL.

Ao desmontar a cápsula é possível observar que há um filtro em seu fundo. Com algum esforço é possível retirar o filtro e nota-se que ele é composto por uma camada mais grossa de plástico e outra mais fina de alumínio como mostra a figura abaixo:



Figura 17: Cápsula mista desmontada (Autor, 2021)

4.2 Fundição do Alumínio

4.2.1 Lavagem e fundição

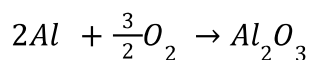
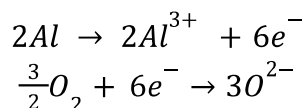


Figura 18: Cadinho com cápsulas de alumínio ao sair do forno (Autor, 2021)



Figura 19: Cadinho com cápsulas de alumínio ao sair do forno observa-se a maior parte do alumínio oxidado e apenas uma pequena porção fundida (Autor, 2021)

Depois de retirar o cadinho que ficou durante 28 minutos no forno com as cápsulas é possível observar que a maior parte do material transformou-se em cinzas e apenas uma pequena porção de fato fundiu (destacada na Figura 19 por um círculo vermelho). Entende-se que a grande maioria do alumínio sofre um processo de oxidação com o ar, dada pela equação a seguir:



Como o ponto de fundição do óxido de alumínio (2075 °C) é muito mais elevado do que o do alumínio (660 °C) a parte que oxidou não chega a fundir e vira escória. A pequena porção de alumínio que chegou a fundir, deve ser a única parte que não estava em contato com o ar e portanto não oxidou.

Com essa fundição concluiu-se que apenas inserir as cápsulas no forno não é suficiente para que as mesmas sejam fundidas para a sua reciclagem.

4.2.2 Lavagem e fundição com banho

As 30 cápsulas utilizadas para a fundição com banho tinham 42,18 g e o banho utilizado era de 197,19 g.

Ao realizar a fundição com banho nota-se que ao adicionar, aos poucos, as cápsulas no cadinho a tensão superficial do banho dificulta o ato de submergir as cápsulas no mesmo.

Com o final do processo de fundição observa-se uma parte de fundido e um pouco de cinza (Figura 20). Ao olhar com mais atenção para a parte de cinzas do processo é possível notar que existem partes de fundido no meio, como mostra a Figura 21.



Figura 20: Cadinho com cápsulas em banho ao sair do forno (Autor, 2021)



Figura 21: Escória da fundição com banho (Autor, 2021)

Após a fundição, pesou-se a amostra novamente. O lingote principal com 185,29 g e a escória com 40,46 g. Ou seja, ao todo depois do banho a massa total foi de 225,75 g, com a perda de 13,62 g que muito provavelmente deve ser da água e material orgânico ainda presentes nas cápsulas, além das cinzas que foram perdidas ou ficam no cadinho.

Com essa fundição, é possível notar que houve uma proporção de oxidação/fundido inferior quando comparada com a primeira, mas o processo ainda apresenta um baixo rendimento. Entende-se que a tensão superficial do banho dificulta a imersão total das cápsulas no mesmo e, por isso, uma parte das cápsulas ainda oxida e vira cinzas. Uma possível solução para esse problema seria preparar um banho mais profundo com um peso para afundar as cápsulas dentro do banho.

4.2.3 Lavagem e fundição com atmosfera da borra do café

As 19 cápsulas utilizadas, que possuíam 26,94 g, foram colocadas ao forno junto com a borra do café.

Ao retirar o cadinho do forno é notável que o volume do pó de café diminuiu consideravelmente. O pó que antes de ir ao forno ia até a boca do cadinho foi radicalmente consumido (Figura 22).



Figura 22: Cadinho ao ser retirado do forno (Autor, 2021)

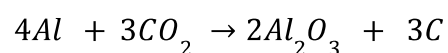
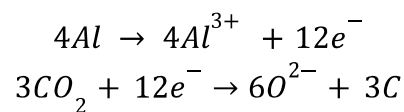
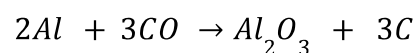
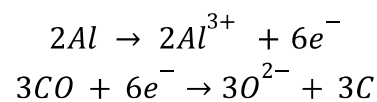
Depois de despejar o material na lingoteira é possível observar, mais uma vez, cinzas e fundido (Figura 23). Mais material fundido que na fundição simples e menos que na fundição com banho.



Figura 23: Lingoteira da fundição com atmosfera de borra de café (Autor, 2021)

Ao pesar a parcela fundida tem-se 7,44 g ,ou seja, aproximadamente 28% de conversão.

O menor volume de borra de café, deve-se à evaporação da água e dos voláteis presentes. O carbono fixo transforma-se em monóxido e dióxido de carbono. Desse modo, conclui-se que o óxido e o dióxido de carbono formados geram uma atmosfera que oxida o alumínio como nas equações abaixo:



Olhando o diagrama de Ellingham (Figura 24) conclui-se que tais reações realmente ocorrem de modo a favorecer a formação do óxido de alumínio.

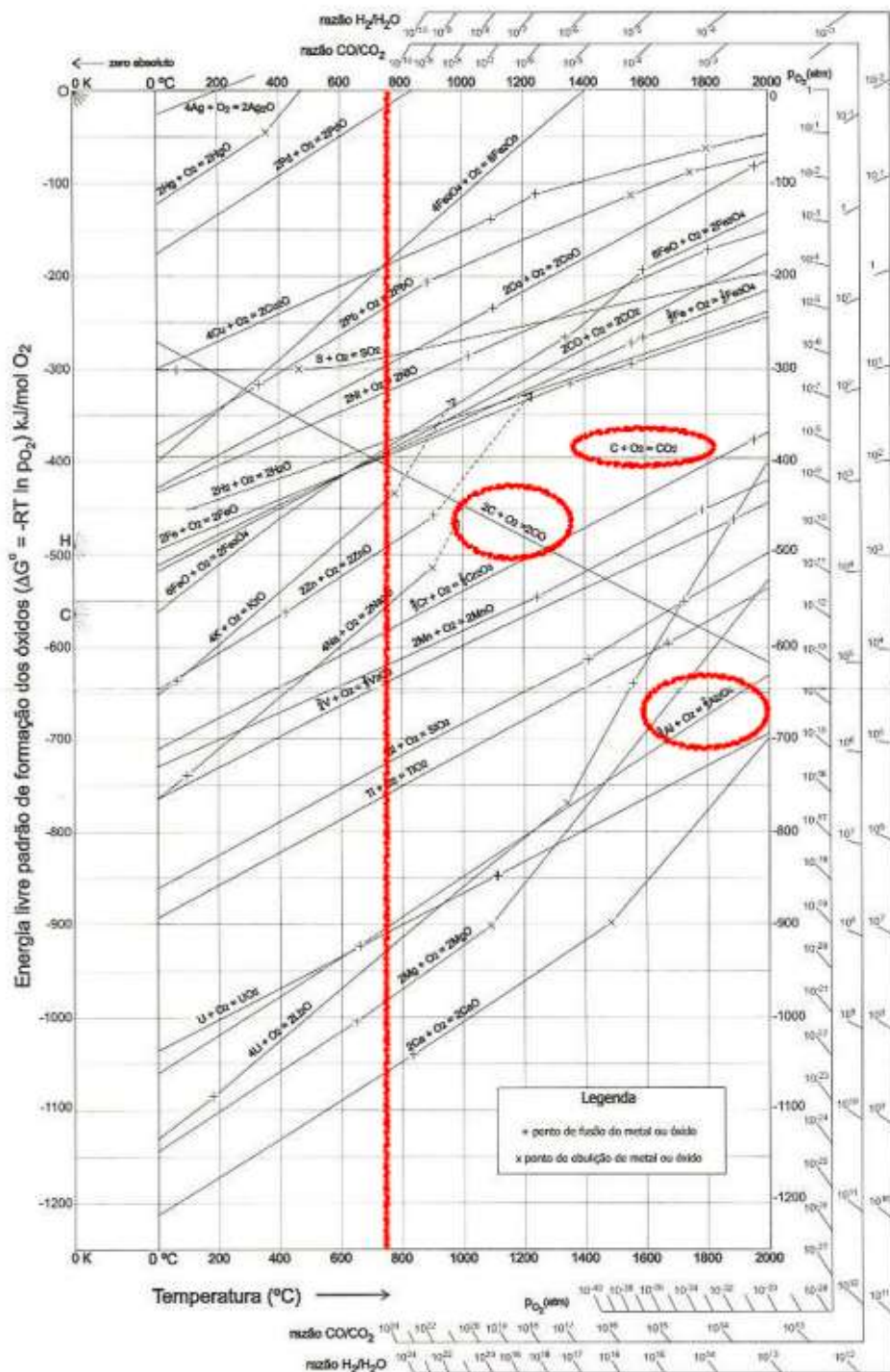


Figura 24: diagrama de Ellingham: oxidação do Alumínio (Adaptado UFRGS, 2021)

4.2.4 Lavagem, preaquecimento e fundição com banho e lã de vidro

As cápsulas de café foram ao forno inicialmente a 320 °C com o intuito de queimar a película polimérica e a tinta das mesmas. Uma hipótese sobre o baixo rendimento da fundição é de que a queima do filme plástico que envolve o alumínio esteja liberando monóxido e dióxido de carbono, o que como foi visto acima no diagrama de Ellingham (Figura 24) favorece a oxidação do alumínio e tem como consequência o menor rendimento na fundição do mesmo em 750 °C.

Ao retirar as cápsulas do forno é notável que estavam mais escurecidas (Figura 25) devido a essa queima.



Figura 25: Lingoteira com as cápsulas de alumínio (Autor, 2021)

Depois de despejar as cápsulas na lingoteira essas e o banho de alumínio, a ser utilizado, foram pesados, obtendo-se 35,55 g nas cápsulas e 338,79 g no banho, totalizando 374,34 g que foram ao forno de 750 °C com a lã de vidro por cima no cadinho.

Ao retirar a amostra do forno e despejar na lingoteira era notável que o volume oxidado era alto. Ao pesar a amostra fundida (244,71 g) conclui-se que o volume oxidado foi de 129,63 g, ou seja, não só as cápsulas oxidaram como também uma parte do banho.

Conclui-se que a atmosfera com a lã de vidro favoreceu a oxidação prejudicando, mais uma vez, a fundição do alumínio.

4.3 Dissolução do filme polimérico

Após as quatro tentativas diferentes de fundir o alumínio, conclui-se que apenas com a lavagem e os diferentes modos de fundir as cápsulas, o rendimento do processo ainda é baixo. Entende-se que o filme polimérico que envolve a embalagem seja o responsável pelo baixo rendimento do processo.

A queima do filme polimérico que envolve o alumínio libera monóxido e dióxido de carbono, o que favorece a oxidação do alumínio (como foi visto no diagrama de Ellingham (Figura 24)) e tem como consequência o menor rendimento na fundição do alumínio em 750 °C.

O ideal para um melhor rendimento da fundição seria retirar o polímero para só então levar o alumínio ao forno. Para entender o melhor solvente para dissolver o filme seria necessário, inicialmente, entender qual o polímero utilizado para então selecionar o solvente mais viável.

É evidente que o fabricante sabe o polímero utilizado, mas para efeitos de estudos, seria necessário a caracterização do mesmo. Nota-se nas cápsulas que o plástico está marcado e apresenta algum tipo de adesivo, sendo assim, não seria indicado o uso de técnicas que identifiquem os tipos de ligações químicas como o infravermelho ou algo do gênero, seria necessário um estudo mais delicado.

Depois de entender que solventes funcionam para o material, seria interessante selecionar o que apresentasse melhor equilíbrio entre impacto ambiental, disponibilidade no mercado e preço.

Devido limitações de tempo e acesso ao laboratório dada a pandemia da Covid-19 não foram feitos os testes de caracterização do polímero nesse trabalho, mas entende-se que com eles seria possível selecionar o melhor solvente, aplicá-lo nas cápsulas depois da lavagem e só então levá-las para o forno e assim melhorar o rendimento do processo, sendo essa uma sugestão interessante para próximos trabalhos.

4.4 Viabilidade de coleta para catadores

Ao pensar na viabilidade do processo de reciclagem é necessário levar em consideração se para os catadores de lixo faria sentido logística e financeiramente de modo a avaliar como deve ser feita a logística reversa do tal produto.

Ao pensar no universo das cápsulas de café observa-se que aproximadamente só 10% do peso de uma cápsula após uso de fato é de alumínio, os outros 90% são referentes a borra de café. O que significa que apenas 10% do peso que o catador tem que juntar e transportar possui, de fato, um valor no mercado. Uma opção seria a limpeza da cápsula antes de carregá-la, entretanto, esse processo de limpeza não é fácil e exige um volume alto de água tornando-se inviável para um catador de rua. Sendo assim, para a venda de um quilo de alumínio o catador teria que carregar um peso de 10 kg.

Levando em consideração que o preço de um quilo de alumínio varia de R\$5,00 a R\$7,00 (Depósito Marmeleiro, 2021) e que o uma cápsula tem aproximadamente 1,4 g, seriam necessárias aproximadamente 720 cápsulas para a venda de 1 Kg de alumínio.

Comparando com as latinhas de alumínio, que já apresentam ampla coleta de catadores, o preço é similar, variando de R\$5.20 até R\$7.00 e um quilo de latinhas correspondem a 67 latinhas (14,5g por lata)(Bruno Menezes, 2021)(IQ-FAQ, 2021). Apesar do volume das cápsulas de alumínio ser menor, a maior desvantagem está no peso, dado que as latas já vem vazias e portanto não é necessário carregar um “peso morto”. Além disso, pode-se considerar como outra desvantagem o fato de que é mais comum encontrar latinhas de alumínio em lixos do que cápsulas de café.

Outro ponto a se considerar é que além da maior dificuldade de encontrar cápsulas de café no lixo, uma vez encontradas é necessário entender qual é feita de alumínio, qual de polímero e qual tem composição mista para saber o valor do material a ser reciclado e o centro de coleta que aceita tal material.

Desse modo, torna-se evidente que a coleta feita por parte dos catadores é inviável e que existe a necessidade de uma logística reversa dedicada por parte dos fabricantes.

4.5 Logísticas Reversas Existentes

Ao se aprofundar sobre as logísticas reversas já existentes é possível notar diferentes processos no mercado.

A Nespresso ® conta com pontos de coletas em algumas cidades, o serviço de “entrega verde” na qual as cápsulas usadas são devolvidas na entrega de novas cápsulas (só disponíveis em alguns bairros da cidade de São Paulo) e como opção para todo o país o envio de cápsulas pelo Correio (Nespresso, 2021).

A Dolce Gusto ® conta com pontos de descarte e com uma logística diferente na qual doa uma sacola reciclável colorida e diferenciada para descarte em lixos reciclados e treina trabalhadores de cooperativas para reconhecerem a sacola e as encaminharem para parceiros reciclarem. Em locais onde não há coleta seletiva a empresa incentiva o uso do aplicativo “Cataki” em que um catador vai até a residência buscar os recicláveis. Há de se ressaltar que o projeto das sacolas coloridas e do “Cataki” restringe-se à região metropolitana da cidade de São Paulo (Nestlé, 2001).

Marcas como Café Pilão ®, Melitta ® e Illy ® têm parcerias com uma empresa chamada TerraCycle, líder global em soluções para resíduos de difícil reciclabilidade, no qual o envio dos resíduos é feito pelo correio. Além disso, quanto mais cápsulas forem enviadas mais pontos o consumidor acumula. Esses pontos podem ser revertidos em doações para uma instituição sem fins lucrativos ou escolas públicas à escolha do consumidor (TerraCycle, 2021).

A marca Três Corações ® conta com pontos de coleta espalhados pelo Brasil e uma parceria com a Eureciclo na qual 100% das embalagens utilizadas são compensadas ambientalmente (Três Corações, 2021).

Algumas marcas como StarBucks ®, Café Orfeu ® e Bravo Café ® não apresentam sistemas de logística reversa explícitos em seus sites.

Apesar das diferentes formas para realizar a logística reversa existentes entre as principais marcas vendedoras de cafés em dose única a porcentagem de cápsulas recicladas ainda é muito baixa. É possível notar que há dificuldade de acesso a uma logística em todos os lugares do país. Além disso, é notável que mesmo em regiões com acesso a diferentes logísticas reversas o índice de retorno de cápsulas ainda é baixo. Tal fato torna-se ainda mais interessante ao levar-se em conta que dado o preço do café em dose única, este é um produto de nicho, com consumo concentrado nas classes A e B, ou seja, com consumo concentrado em pessoas com maior acesso à informação e que se intitulam mais esclarecidos e interessados em um desenvolvimento mais sustentável.

5 Conclusões

A tendência para os próximos anos é que o mercado de cápsulas de café de dose individual continue a crescer, sendo assim, o resíduo gerado pelo consumo deste tipo de produto também só tende a aumentar.

Levando em conta a necessidade de um desenvolvimento sustentável, baseado em uma economia circular, é de suma importância o estudo do fim de vida das cápsulas em busca de uma maneira de inseri-las na economia novamente.

Ao pensar na viabilidade do processo de reciclagem podemos dividi-lo em três partes: o processamento do material por si só (lavagem + fundição (no caso do alumínio)), a viabilidade da coleta por catadores e a logística reversa utilizada.

Ao analisar o processamento do alumínio conclui-se que apesar de ser um material infinitamente reciclável, este não é tão simples. Como o processo de reciclagem não é fácil, é necessário uma linha de reciclagem própria, tornando apenas o ato de jogar o resíduo no lixo reciclado ineficiente, dado que desse modo as cápsulas acabam em aterros sanitários e os recursos não retornam para a cadeia de produção.

Inicialmente, é necessário higienizar as cápsulas. Como foi visto, a borra do café favorece a oxidação do alumínio diminuindo a eficiência do processo de fundição. No processo de limpeza é utilizada uma quantidade considerável de água. A borra do café pode ser usada em compostagem e o alumínio é fundido e vendido para reutilização.

Para fundir o alumínio o melhor método encontrado foi em banho. O ideal seria utilizar um forno de poço com um peso para que as cápsulas afundassem no banho e oxidassem o menos possível, melhorando o rendimento do processo.

Outra solução para melhor o rendimento seria fazer a dissolução do filme plástico que envolve o alumínio antes de iniciar o processo de fundição. Assim diminuiria a quantidade de óxidos de carbono na atmosfera do forno, diminuindo a oxidação do alumínio e aumentando o rendimento do processo. Esse teste não foi

realizado no presente trabalho por falta de tempo e disponibilidade, mas é uma sugestão interessante para futuros estudos.

Olhando para a viabilidade da coleta por catadores conclui-se que devido ao fato de somente 10% do peso de uma cápsula pós uso ser de alumínio, o peso sem valor de mercado a ser carregado pelos catadores inviabiliza o foco dos mesmos nas cápsulas. Além disso, é necessário considerar que não é em qualquer lixeira da rua que se pode encontrar cápsulas de café e que depois de encontradas, é necessário distinguir o material da cápsula encontrada.

Desse modo, faz-se de extrema necessidade uma logística reversa por parte das empresas fabricantes de café em dose única. Como foi discutido no trabalho, já existem diversas maneiras de realizar essa logística, entretanto seria necessário uma expansão das logísticas já existentes ou até novas maneiras para que todas as regiões do Brasil pudessem ter acesso a um meio de reciclar suas cápsulas e assim melhorar os índices de reciclagem do produto.

Em suma, nota-se a dificuldade de se reinserir as cápsulas na cadeia de produção em busca de uma economia circular. As dificuldades no processo de reciclagem exigem uma complexa logística reversa por parte dos fabricantes, já que o simples ato de jogar em lixos reciclados não é suficiente e não vale a pena para os catadores de lixo. A importância da conscientização em todas as etapas (fabricantes, consumidores e gerenciadores de resíduos) com mais informações e uma maior quantidade de pontos de coleta pelo país se faz necessária para que se conscientizem da importância de destinar corretamente o resíduo gerado pelo consumo de cápsulas de dose individual.

6 Referências

1. ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO CAFÉ (2019). Perspectivas do Mercado de Café - Relatório. Rabobank. Disponível em <http://consorciopesquisacafe.com.br/arquivos/consorcio/consumo/Perspectivas_Mercado_de_Cafe.pdf>. Acesso em Maio de 2021.
2. ABIC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DO CAFÉ. Indicadores da Indústria (2020). Disponível em <<https://www.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2020/>>. Acesso em Junho de 2021
3. ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico (2019). Perfil 2019 – Indústria Brasileira de transformação e reciclagem de material plástico, 2020. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Preview_abiplast_2019.pdf>. Acesso em Maio de 2021.
4. ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020). Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil. Disponível em <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em Maio de 2021.
5. Allen, Adirson (2018). Economia Linear, Economia Circular e Blockchain.
6. Alumínio Revista (2020). Brasil mantém a liderança mundial na reciclagem de latas de alumínio. Disponível em: <<https://revistaaluminio.com.br/brasil-mantem-a-lideranca-mundial-na-reciclagem-de-latas-de-aluminio/>>. Acesso em Novembro de 2021.
7. ASI - Aluminium Stewardship Initiative. ASI's objectives (2016). Disponível em: <<http://aluminium-stewardship.org/about-asi/>>. Acesso em Junho de 2021.

8. BARRETOS, F. R. M.; SILVA, M. C. C.; PELÁ, A. (2013). Impactos ambientais na destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos na cidade de Ipameri-GO: um estudo de caso. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET, Ipameri, Goiânia, v. 17, n. 17, p. 3230 – 3239.
9. Brasil (2010). Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF. Decreto nº 7.404 de 12 de dezembro de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em Junho de 2021.
10. Benvenido, A. Z (2010). A nomeação no processo de construção do catador como ator econômico social. Brasília: Universidade de Brasília.
11. Bruno Menezes (2021). O Tempo - Pesquisa revela que preço pago em materiais recicláveis pode variar 400% na RMBH. Disponível em: <<https://www.otempo.com.br/economia/pesquisa-revela-que-preco-pago-em-materiais-reciclaveis-pode-vari-400-na-rmbh-1.2492588>>. Acesso em Outubro de 2021.
12. Canevarolo Junior, Sebastião V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2.ed.rev. e ampl. [São Paulo]: Artliber, [2006]. 277p., il.;gráfs., tabs. ISBN 8588098105 (broch.).
13. CNN (2021). COP26 termina com acordo climático; veja o que deu certo e as falhas nas negociações. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/cop26-termina-com-acordo-climatico-veja-o-que-deu-certo-e-as-falhas-nas-negociacoes/>>. Acesso em Novembro de 2021.

14. Cunha, Giovanna Gonçalves Vilaça da ET (2020). AL. A LOGÍSTICA REVERSA DAS CÁPSULAS DE CAFÉ EXPRESSO. Cap Accounting And Management, Paraná, v. 2019, n. 13, p. 1-18, jun. 2020. Anual.
15. De Almeida, M. (2016) Nestlé perde patente da Nespresso e enfrenta queda no mercado de cápsulas de café. LinkedIn. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/nestlé-perde-patente-da-nespresso-e-enfrenta-queda-de-de-almeida/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: Junho de 2021.
16. Depósito Marmeleiro (2021). Disponível em: <<https://www.depositomarmeleiro.com.br/tabela.php>>. Acesso em Outubro de 2021.
17. Duarte, et al (2012). Como se fazem cápsulas de café?. FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Porto, Portugal. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/bestof/12_13/files/REL_1M6_04.PDF>. Acesso em Junho de 2021.
18. Eco Coffee (2017). The Revolutionary Capsule. Disponível em: <<https://www.ecocaffe.com.au/pages/so-green-we-could-plant-it>>. Acesso em Junho de 2021.
19. Ecycle (2013). Nespresso: café, cápsula, máquinas e sustentabilidade?. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/nespresso-capsula-maquinas-sustentabilidade/>>. Acesso em Maio de 2021.
20. Euromonitor International (2015). Tendências do Mercado de Café. Disponível em: <http://consorciopesquisacafe.com.br/arquivos/consorcio/consumo/Tendencia_do_Mercado_de_Cafe_-_2015_1.pdf>. Acesso em Julho de 2021.

21. Euromonitor International (2019). Indicadores da Indústria (2019). Café no Brasil: Estabilidade no Pós-crise - Relatório. Disponível em <http://consorciopesquisacafe.com.br/arquivos/consorcio/consumo/Cafe_no_Brasil_Estabilidade_no_Pos_Crise.pdf>. Acesso em Maio de 2021.
22. F. Ashby, M. (2016). Materials and Sustainable Development. Butterworth-Heinemann.
23. Folha de São Paulo (2014). Com perda de patentes, Nespresso perde espaço para concorrentes. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2014/01/1392147-com-perda-de-patentes-nespresso-perde-espaco-para-concorrentes.shtml?cmpid=menupe>>. Acesso em Junho de 2021.
24. Folha de São Paulo (2017). Proteger o futuro do café é o maior objetivo da Nespresso. Disponível em: <<https://estudio.folha.uol.com.br/nespresso/2017/12/1939887-nespresso-promove-acoes-para-preservar-o-futuro-do-cafe.shtml>>. Acesso em Maio de 2021.
25. Gonçalves Dias, S. L. F. et al (2010). Frames de ação coletiva: uma análise da organização do Movimento Nacional de Catadores Recicláveis no Brasil - MNCR. In: III SEMINÁRIO NACIONAL E I SEMINÁRIO INTERNACIONAL MOVIMENTOS SOCIAIS PARTICIPAÇÃO E DEMOCRACIA: MOVIMENTOS SOCIAIS, PARTICIPAÇÃO E DEMOCRACIA. Anais... Florianópolis: NPMS. p. 2007 - 2029.
26. Gorni, A.A. (2006). Siderúrgicas são o novo espaço para reciclagem energética de plásticos pós-consumo. Plástico Industrial; Aranda editor; ano VIII n.89, p.84-100. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_PI_Jan2006.pdf>. Acesso em Junho de 2021.

27. Guimarães, C.; Viana, L. S.; Costa, P. H. de S. (2015). Os desafios da consciência ambiental: o marketing verde em questão. In: C@LEA – Cadernos de Aulas do LEA. n. 4, p. 94-104, Ilhéus – BA.
28. Instituto Axxus; UNICAMP - Universidade de Campinas (2019). Hábitos e Preferências dos Consumidores de Café no Brasil - Pesquisa. Disponível em <http://consorciopesquisacafe.com.br/arquivos/consorcio/consumo/Pesquisa_Habitos_Preferencias_Consumidores_Cafe_Brasil.pdf>. Acesso em Maio de 2021.
29. International Coffee Organization (2012). Monthly Coffee Market Report: May 2012. Disponível em <<http://www.ico.org/documents/cmr-0512-e.pdf>>. Acesso em Maio de 2021
30. IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2010). Brasil perde R\$ 8 bilhões anualmente por não reciclar. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=1170>. Acesso em Junho de 2021.
31. IQ-FAQ - Quantas latinhas para dar um kilo? (2021). Disponível em: <<https://iq-faq.com/pt/Q%26A/page=d030071c0bcb8d535e68416e29d65040>>. Acesso em Outubro de 2021.
32. Kotsev, A. ATF-23 LBC KASI TEMPRA PACK (2017). Thermoforming machine for coffee capsules. Disponível em: <<http://www.kt-pack.com/content/view/60/243/lang,en/>>. Acesso em Maio de 2021.
33. Lacerda, L. Logística Reversa: Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. Disponível em:

<http://www.paulorodrigues.pro.br/arquivos/Logistica_Reversa_LGC.pdf>. Acesso em Junho de 2021.

34. Larse, Isabel (2017). A logística reversa dos óleos residuais em Curitiba> estudo de caso do bairro de Santa Felicidade. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2017. 142p. Il. Color. Curitiba.

35. Mancini, S. D.; Zanin, M. (2009). Resíduos Plásticos e Reciclagem: Aspectos gerais e tecnologia. São Carlos: EdUFSCar – Editora da Universidade Federal de São Carlos.

36. Major and Calafut (1998), Polypropylene, 1st Edition

37. Melitta. Disponível em: <<https://www.melitta.com.br/reciclacapsula>>. Acesso em Maio de 2021.

38. Ministério do Meio Ambiente (2012). Plano de Gestão de Resíduos Sólidos – Manual de Orientação. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilhas/manual_de_residuos_solidos3003_182.pdf>. Acesso em Junho de 2021.

39. Murthy, P. S.; Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition — A review. Resources, Conservation and Recycling, v. 66, p. 45–58, set. 2012.

40. Nescafé Dolce Gusto. Disponível em: <<https://www.nescafe-dolcegusto.com.br>>. Acesso em Junho de 2021.

41. Nespresso (2018). Centros de reciclagem da Nespresso. Disponível em: <<https://graoespecial.com.br/centro-de-reciclagem-da-nespresso/>>. Acesso em Junho de 2021.
42. Nespresso. Disponível em: < <https://www.nespresso.com/br/>>. Acesso em Maio de 2021.
43. Nestlé (2020). Disponível em: <<https://www.nestle.com.br/imprensa/releases/nescaf-e-dolce-gusto-amplia-modelo-de-coleta-e-reciclagem-de-capsulas>>. Acesso em Outubro de 2021.
44. PDG Brasil - Perfect Daily Grind (2020). Uma Breve Historia das Capsulas de Café. Disponível em <<https://perfectdailygrind.com/pt/2020/11/03/uma-breve-historia-das-capsulas-de-cafe/>>. Acesso em Junho de 2021.
45. Pires, H. (2007). A contribuição da reciclagem do alumínio para o alcance do desenvolvimento sustentável. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos07/1262_artigo%20aluminio_Seget_2007_Prof.pdf> Acesso em: Junho de 2021.
46. Pontes, N. (2016). À espera de reciclagem, cápsulas de café sobrecarregam aterros sanitários. Folha de São Paulo. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/seminariosfolha/2016/06/1784370-a-espera-de-reciclagem-capsulas-de-cafe-sobrecarregam-aterros-sanitarios.shtml>> . Acesso em Maio de 2021.
47. Proteste (2016). Rotulagem das cápsulas de café não informam descarte correto após uso, constata PROTESTE. Disponível em:

<<https://www.proteste.org.br/institucional/imprensa/press-release/2016/rotulagem-da-s-capsulas-de-cafe-nao-informam-descarte-correto-apos-uso-constata-proteste>>.

Acesso em Maio de 2021.

48. Rodrigues et al (2002). Logística Reversa: Conceitos e Componentes do Sistema. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Paraná. Disponível em <https://www.researchgate.net/profile/Jose_Leal3/publication/237506375_LOGISTICA_REVERSA_-_CONCEITOS_E_COMPONENTES_DO_SISTEMA/links/549023380cf214269f2656f1.pdf>. Acesso em Junho de 2021.

49. Shibao, Fácio Ytoshi; MOORI, Roberto Giro; SANTOS; Mário Roberto (2010). A logística reversa e a sustentabilidade empresarial. Anais do VIII Seminário em Administração.FEA-USP.

50. Singer, P. (2017). Recycling is in trouble — and it might be your fault. USA Today. Disponível em: <<https://www.usatoday.com/story/news/politics/2017/04/20/weak-markets-make-consumers-wishful-recycling-big-problem/100654976/>>. Acesso em Junho de 2021.

51. Smith, W. (1998) – “Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais” – 3ª Edição - Lisboa - McGraw Hill. CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V. Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber, 2004. 448 p., il. Inclui bibliografia e índice. ISBN 8588098199 (broch.).

52. TerraCycle (2021). Disponível em: <<https://www.terracycle.com/pt-BR>>. Acesso em Outubro de 2021.

53. Tracy Farnsworth (2020). What is Wish-Cycling and Why Does It Matter?. Disponível em: <<https://recyclenation.com/2020/12/what-is-wish-cycling-and-why-does-it-matter/>>. Acesso em Junho de 2021.
54. Três Corações (2021). Disponível em: <<https://www.escolhatres.com.br/reciclagem/>>. Acesso em Outubro de 2021.
55. UFRGS (2021). Disponível em: <http://www.ufrgs.br/termodinamica2/crbst_8.html>. Acesso em Outubro de 2021.
56. Vasileios Rizos, K. T. (2017). The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts.
57. Worrel, E.; Reuter, M. A. (2014). Definitions and Terminology. In: Worrel, E.; Reuter, M. A. (Ed.). Handbook of Recycling: State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists. Amsterdam: Elsevier. p. 9-16.